

曲 軸 的 設 計

熊 琳 編 著



机 械 工 業 出 版 社

曲 軸 的 設 計

熊 琳 編 著



机 械 工 業 出 版 社

1 9 5 8

出版者的話

本書專論曲軸設計中的各項問題，特別着重發動機曲軸。本書敘述了曲軸的結構、制造曲軸的各種材料，說明設計的方法和步驟；介紹了各種經驗公式和數據，以及最常用的強度和扭轉振動的計算方法，而且還商討了曲軸設計的工藝性；並在最后一章中有曲軸設計示例。

本書可供從事內燃機、蒸汽機等設計的技术人員、研究工作者及大專學生參考。

NO. 1616

1958年2月第一版 1958年2月第一版第一次印刷

850×1168 $1/32$ 字數 223 千字 印張 9 0,001—2,000 冊

機械工業出版社(北京東交民巷 27 號)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價(10) 1.70 元

目 次

序	4
第一章 緒論	5
1 曲軸的組成(5)——2 曲軸的分類(12)——3 曲拐-連杆機構的運動學(22)	
第二章 曲軸設計的基本	27
1 設計的依據資料(27)——2 蒸汽機和內燃機曲軸設計的特點(31)——3 設計的步驟(33)——4 曲軸形狀和結構的選擇(36)	
第三章 材料	44
1 鍛鋼(44)——2 鑄鐵與鑄鋼(49)——3 材料的選擇(54)	
第四章 經驗公式與經驗比例	58
1 蒸汽機曲軸(58)——2 內燃機曲軸(68)	
第五章 軸頸壓力及潤滑	80
1 曲柄銷壓力的分析(80)——2 主軸頸壓力的分析(89)——3 軸頸的壓力強度(92)——4 軸頸的潤滑(99)	
第六章 平衡計算	107
1 不平衡力和力矩(107)——2 發動機的平衡分析(110)——3 平衡重量的計算(129)	
第七章 強度計算	135
1 開式曲軸的強度計算(135)——2 閉式曲軸的強度計算(140)——3 分段計算法(143)——4 連續直梁計算法(151)——5 連續組合梁計算法(162)	
6 影響曲軸強度的因素(175)——7 允許強度的決定(183)——8 按變負荷特性驗算曲軸(186)——9 紅套配合的計算(193)	
第八章 扭轉振動	198
1 單質量的扭轉振動(198)——2 多質量的扭轉振動(203)——3 曲軸的自由頻率(210)——4 臨界速度(228)——5 扭轉振動的實際振幅與應力(237)	
第九章 曲軸設計的工藝性	246
1 設計的經濟性和合理性(246)——2 尺寸的合理注法(247)——3 表面光潔度與公差(249)——4 技術要求(255)	
第十章 曲軸設計示例	262
參考文獻	280

序

在我国进行大规模的社会主义经济建设时期，发动机的需要与日俱增。解放前，发动机多由国外进口；目前在學習苏联先进經驗的基础上，已能很好地进行仿造。但是党号召我們向科学进军，迅速地赶上世界先进水平，因此必須逐步地能自行設計各种发动机，以应国民經济各部門的需要。

发动机中，最主要的机件就是曲軸，所以曲軸設計就成为发动机的設計師們研究的对象。可是关于曲軸設計的資料均分散在各有关書籍中，很少有專書論及，設計師常感寻找資料之苦。編者从事設計工作多年，將收集苏联和英美各国書籍中有关曲軸設計的資料，有系統地加以整理彙編成此書，希望能对設計師略有帮助。

本書共分十章，并按設計程序排列；前八章叙述有关設計的步驟和方法，第九章簡略介紹曲軸設計的工艺性，第十章是設計实例。

書中的重要公式和数据均分別注明来源，以备讀者查考。有些英美書籍中收集来的数据，在可能范围之內均已換算成公制，但尙有个別經驗公式，換算不便，只得仍保留原有英制，希讀者原諒。

編者技术水平有限，閱讀的書籍不多，必然有不完善和錯誤的地方，盼同志們批評及指教！

編著者

一九五六年五月于上海

第一章 緒論

1 曲軸的組成

曲軸為帶有曲拐的軸，它的作用是將直綫往復運動轉變成旋轉運動，或者將旋轉運動變成直綫往復運動。同時，曲軸為消耗功能與供給功能的聯系者，例如發動機的功能全部由曲軸傳出，而工作機所需要的動力則由曲軸輸入，所以曲軸為發動機和工作機的主要機件。

曲軸在機器中負有重要的任務，其本身的製造成本也昂貴。同時曲軸的損壞可能嚴重地引起其他重要機件的毀損。

無論曲軸的形狀和結構如何，曲軸總是兼受着彎曲力矩和扭轉力矩，這些力矩不特數值很大，而且是具有周期變化的性質。不但如此，在工作時曲軸更受有扭轉振動的附加應力，因此曲軸的受力情況是非常複雜的。

曲軸受力情況的複雜性和它在機器中地位的重要性，迫使設計師對於曲軸設計給予特別重視。

為了適應各類機器的需要，曲軸具有多種多樣的結構形式。曲軸一般均由下列五部分組成：

1 主軸頸 主軸頸在主軸承中旋轉，為曲軸支承在機身或機座上的支點。每一根曲軸至少有兩個主軸頸，但對於多曲拐的曲軸，為了減少彎曲變形，常常在當中再加一個或數個主軸頸。至於另加主軸頸的多少是這樣來考慮：就是使工作時所產生的彎曲變形不致引起過大的磨損。一般蒸汽機，除單流式者外，主軸頸的數目可能多至汽缸數的兩倍；空氣壓縮機、單流式蒸汽機和內燃機的主軸頸數目可用（1）式求出：

$$z = \frac{N}{K} + 1, \quad (1)$$

式中 z ——主軸頸的数目； N ——汽缸的数目；

K ——常数，見表 1。

表1 K 的数值

在星形發動机中，主軸頸的数目是等于汽缸的列数加一。在重型發動机上，有时为了装置附屬机构，將主軸頸的数目增加一个或数个。

汽缸的排列方式	K 的数值
直綫排列(單列式, 重型)	1
直綫排列(單列式, 輕型)	2~4
V形排列	2
W形排列	3

2 曲柄銷 曲柄銷也叫做曲柄頸，有时又叫做連杆軸頸。曲柄銷在連杆大端的軸承中旋轉，为曲軸与連杆的連接部分。它的数目决定于汽缸排列的方法和汽缸的多少。在汽缸直綫排列的發動机中，曲柄銷的数目通常是等于汽缸的数目（串联的几个汽缸应当作为一个計算）；在 V 形或 W 形的發動机中，曲柄銷的数目是等于每列的汽缸数；在星形發動机中，曲柄銷的数目等于汽缸的列数；而在对置活塞式的二冲程發動机中，則每一对汽缸有一个長的和兩個短的曲柄銷，如圖 1 所示。但对置活塞式發動机具有兩根曲軸的，則每一曲軸的曲柄銷数目等于汽缸数。

3 曲臂 曲臂也叫做曲柄，曲臂是連接曲柄銷与主軸頸或連接兩個相鄰曲柄銷的部分。前者叫做短臂，后者叫做長臂。曲臂的形狀很多，圖 2 是通常所用的几种。在圖 2 中， a 是長方形曲臂，制造簡便，多用于老式低速發動机上； c 是將長方形曲臂的四个角上的多余

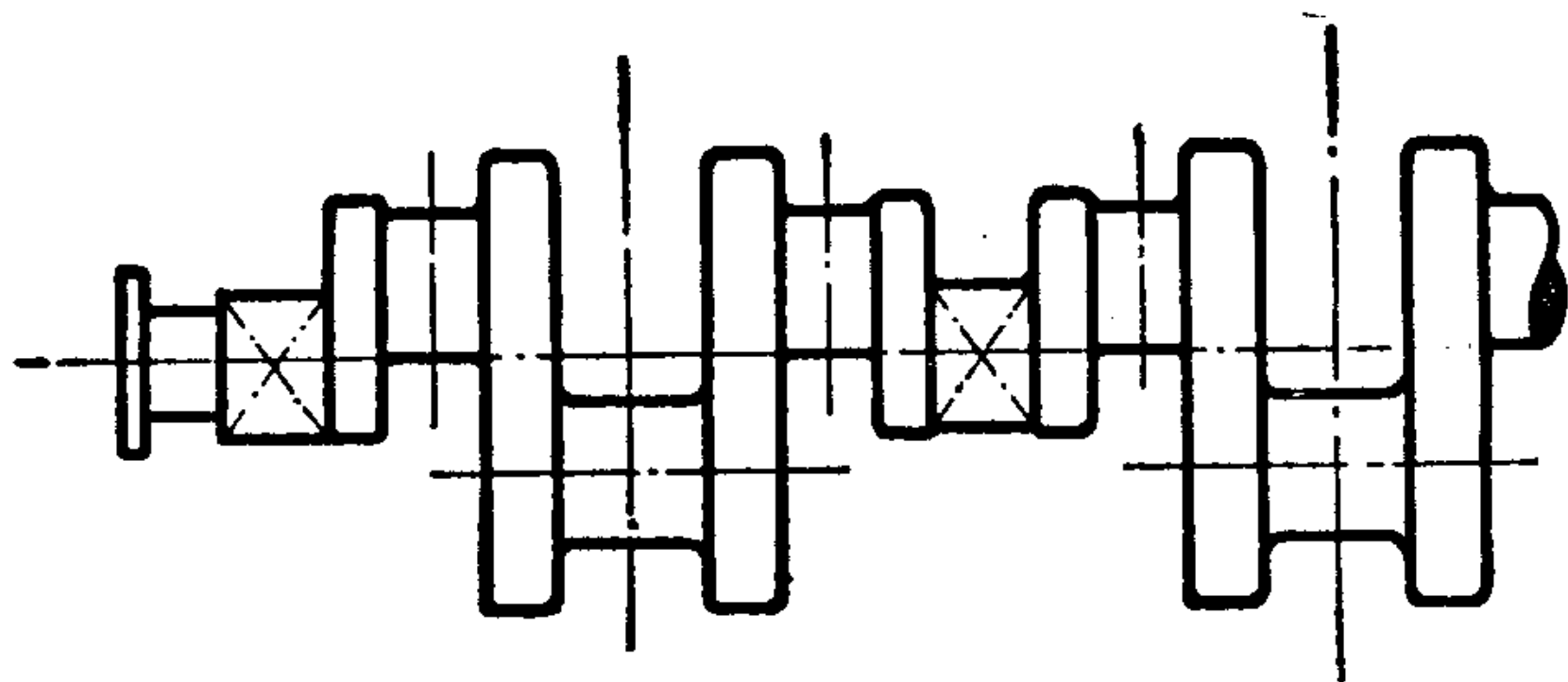


圖 1 对置活塞式柴油机的曲軸。

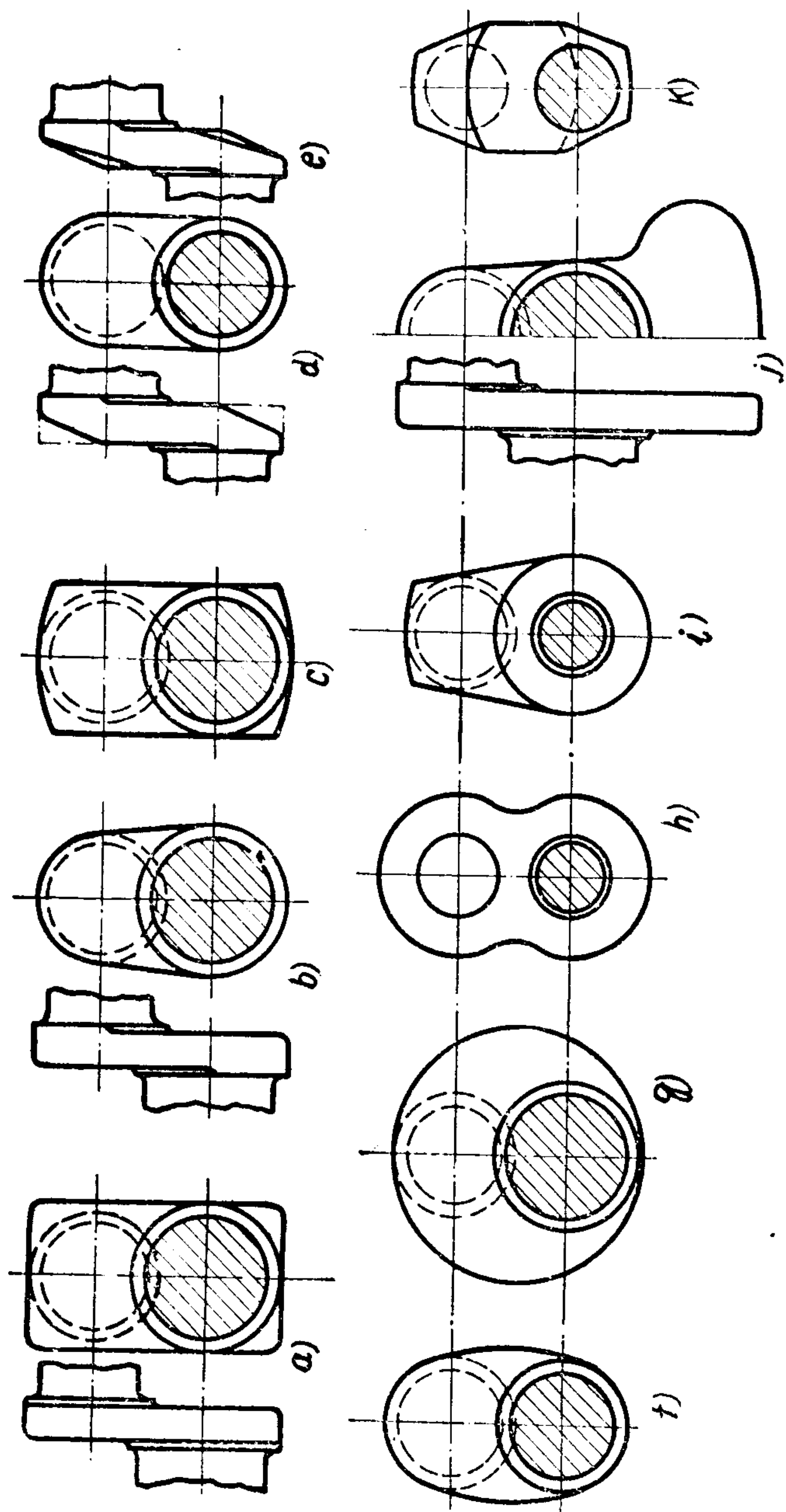


圖 2 曲臂的形狀。

材料割去而形成的，这种曲臂可使曲軸的重量減輕，同时也不影响它的强度，目前多用于低速發動机上； b 、 d 、 e 和 k 是高速發動机曲軸所用的曲臂，是由 c 式割去更多的多余材料而成的。有时为了增加曲臂的强度，但又

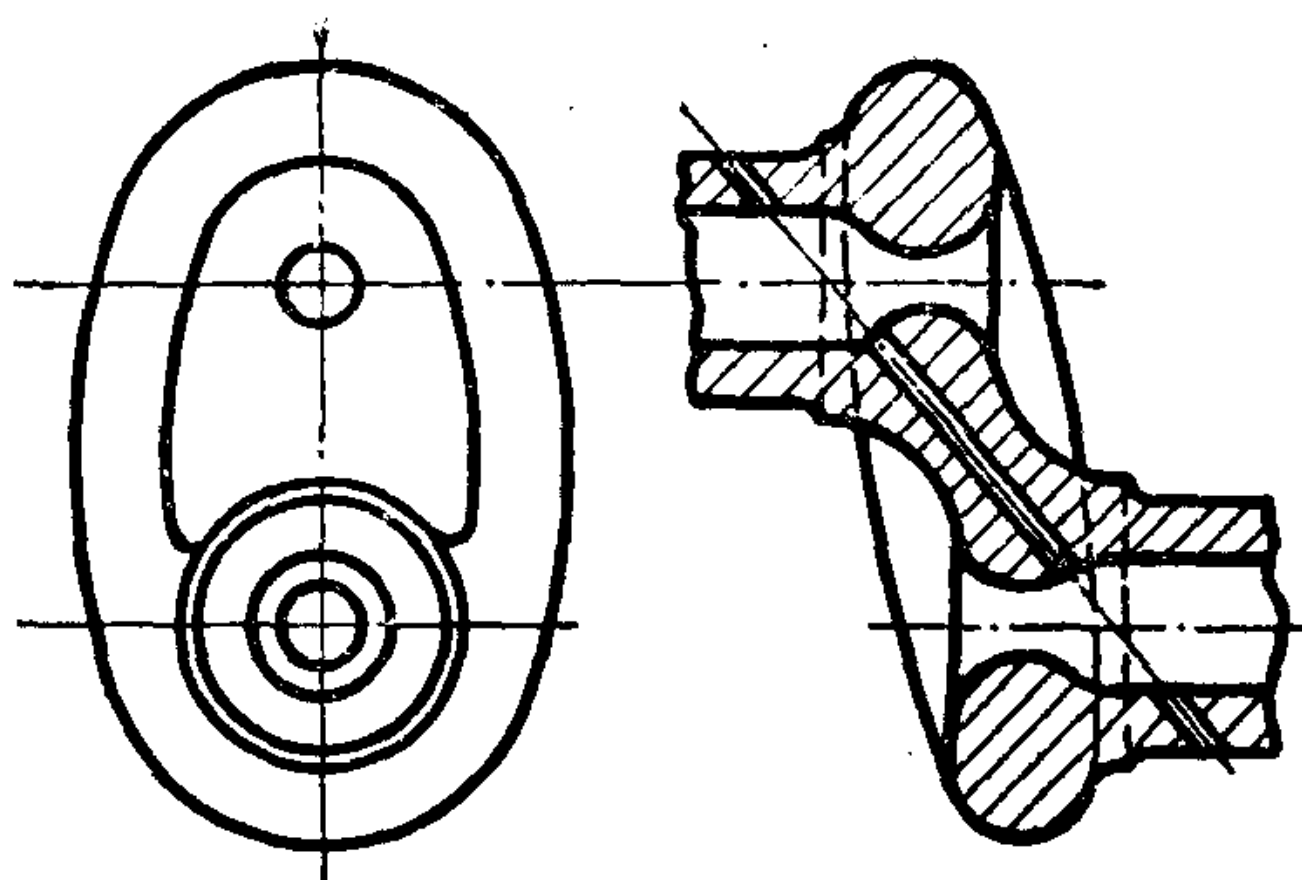


圖 3 理想的曲臂形狀。

受到汽缸間的中心距離的限制而無法增厚曲臂，这时就不得不从加大闊度方面来补救，因此曲臂的形狀乃变成 f 式的橢圓形，甚至 g 式的圓形； h 为全組合曲軸的曲臂； i 为半組合曲軸的曲臂； j 为帶有平衡重量的曲臂，这种曲臂不能用自由鍛造的方法鍛出，只能用模型鍛造加工，因此仅适用于大量生产的小型發動机上。圖 3 是理想的形狀，但是这种复杂的形狀不可能用鍛造的方法鍛出来，所以这种曲臂只在鑄造曲軸上采用。

曲臂与曲柄銷的总称叫做曲拐，曲拐半徑是主軸頸与曲柄銷中心間的距離，它应当等于活塞冲程的一半。

曲軸上，曲拐的相互位置是由机器的型式决定的。內燃机的曲拐大多数是按照圓周等角度分布的；而蒸汽机曲軸則不然。双膨脹蒸汽机的双拐曲軸是將曲拐排成 90° ，而三膨脹蒸汽机的三个曲拐則互成 120° 。

曲拐的形狀和結構大大地影响了曲軸的强度。經過一系列的耐久試驗，結果如圖 4 所示。試驗是在軸頸長度、曲拐半徑、軸頸直徑、曲臂厚度等均保持不变的状況下来进行的。試驗証明：普通曲拐（圖 4 a ）仅能承受 4.5 公斤/公厘² 的对称循环扭轉应力；鑽有腹孔后（圖 4 b ），則增加至 8.5 公斤/公厘²；加寬曲臂（圖 4 c ）后，耐久强度可升至 12 公斤/公厘²，也就是普通曲拐的 2.5 倍。試驗更証明將腹孔的端口縮

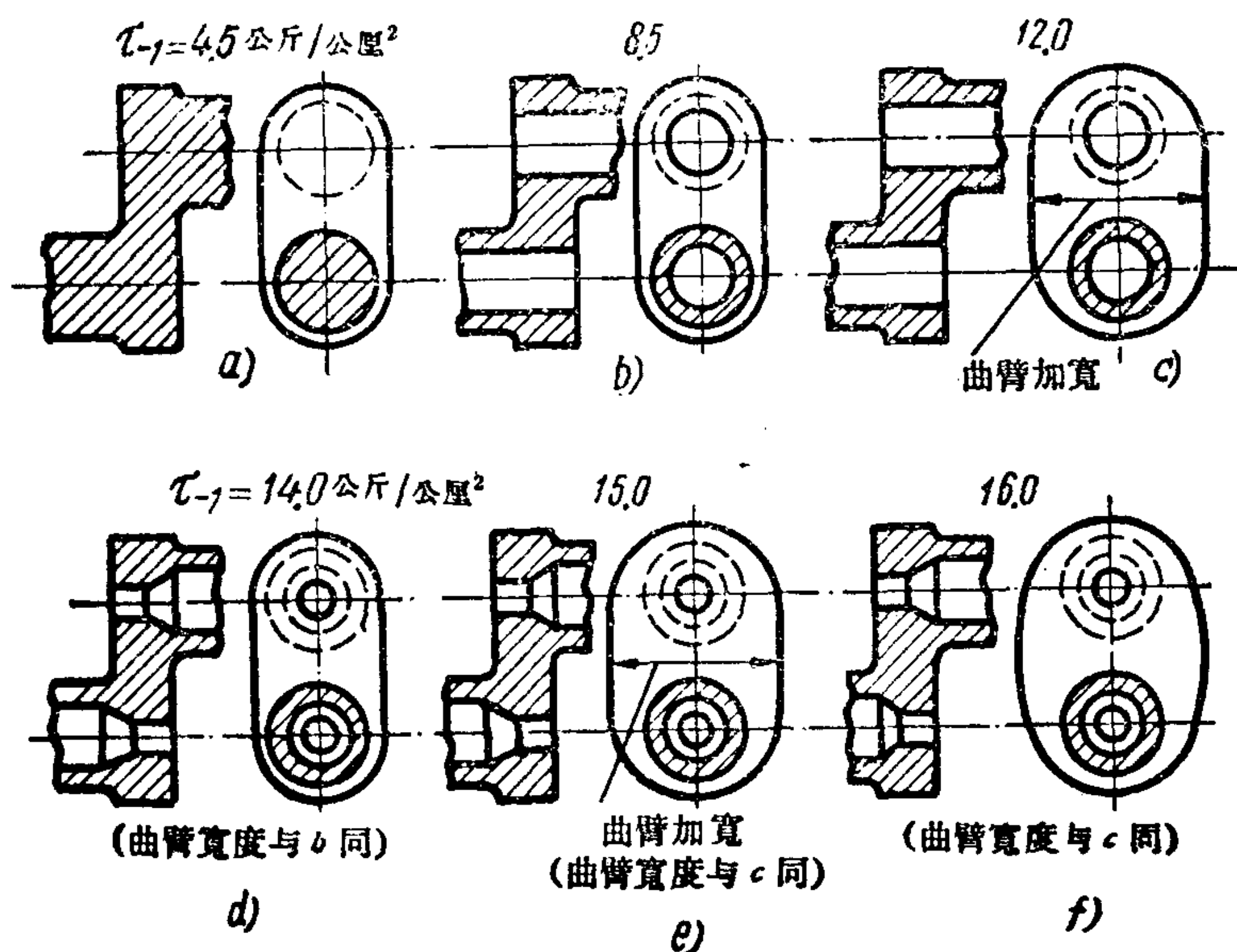


圖 4 曲拐形狀和結構對於強度的影響。

小，如圖 4d，則強度可由圖 4b 的 8.5 升至 14 公斤/公厘²，由圖 4c 的 12.0 升高至 15.0（圖 4e）。如將曲臂改成橢圓形，則強度更可提高至 16.0 公斤/公厘²（圖 4f）。

4 曲軸端部 一般的曲軸均有兩個端部，在立式或星形發動機上稱之為前端和後端，而在臥式發動機上則為左端和右端。但是單拐的開式曲軸只有一個端部，因為另一端是曲拐。很显然，雙拐開式曲軸的兩端都是曲拐，那就沒有端部了。雖然曲軸端部不是各種曲軸都必須具有的，但對閉式曲軸來說端部却是重要的部分。

所謂曲軸前端和後端，是指曲軸裝在發動機上的位置而言，在發動機首部的叫做前端，尾部的叫做後端。一般發動機的功率是由後端輸出；而工作機的功率通常是由前端輸入的。

常用的輸送功率的裝置有飛輪、聯軸器、离合器或皮帶輪等。為了適應這些裝置的接合，輸入或輸出功率的曲軸端部有下列三種

結構。

一、帶鍵槽的錐形軸端 曲軸末端制成錐形，與功率輸出機件的錐孔配合。軸端的錐度一般采用 1:10，但是有時候也用 1:15 或 1:5。這種方法的構造簡單，製造容易，而且裝拆便利，但是增加了曲軸的長度，因此在移動式發動機上多不採用。況且這種方法是依靠摩擦力和鍵來傳遞力矩的，所以也不適用在大馬力的發動機上。蘇聯 НИДИ 2 Д16/20 型兩沖程柴油機的曲軸就是利用錐形軸端和鍵銷來联接飛輪的（圖 5）。

錐形軸端與錐孔的配合必須接觸良好。當以顏色塗料來檢驗時，在每邊為 25 公厘的正面積上至少要有三點接觸，全部的接觸面應不少於 75%。

二、圓柱形的軸端 這種軸端是利用緊壓或紅套來與功率輸出機件配合的。採用緊壓配合時，一般是另加一個或兩個鍵銷來保證功率的傳遞，配合的過盈數值是軸直徑的 $1/800 \sim 1/1000$ 。當用紅套方法联接時，則不需要再加鍵銷，但過盈數值卻應當大一些，通常是軸直徑的 $1/550 \sim 1/750$ 。

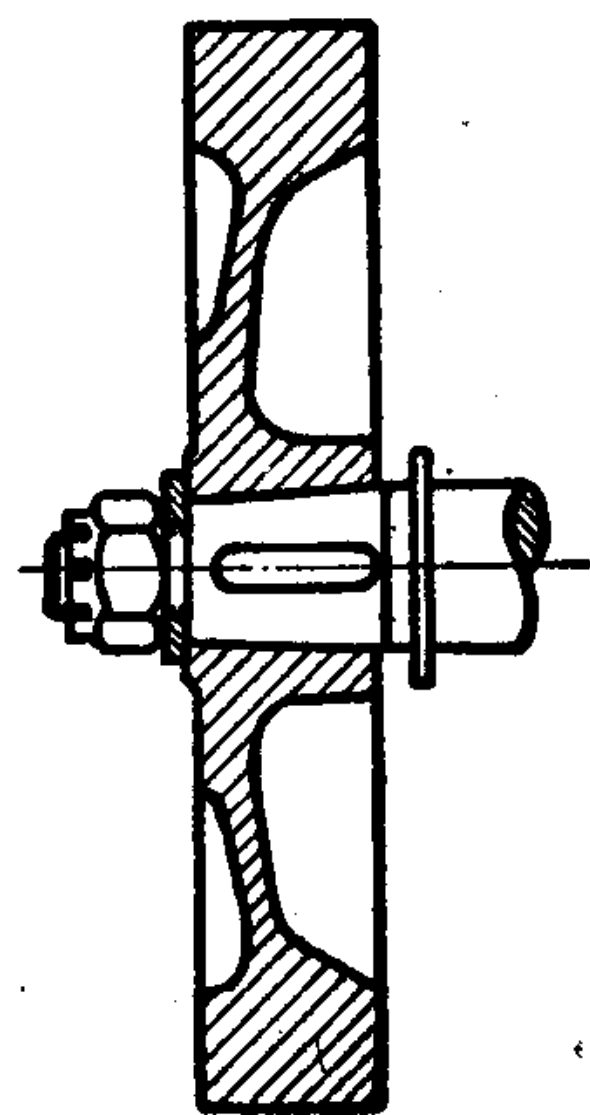


圖 5 帶鍵槽的錐形軸端。

這種联接方法雖然使曲軸後端製造方便，但裝配麻煩。也和錐形軸端一樣，增加了曲軸的長度，並且不能絕對保證功率傳遞的可靠性。所以這種結構採用得很少。

三、帶有法蘭的軸端 這種結構極為普遍，大多數的曲軸都採用。這種結構不但能縮短曲軸的總長度，並且也便於功率輸出機件的裝拆。功率輸出機件是借螺栓與法蘭联接的。常常在法蘭的外端面上制有凹圓或凸圓，以便配合件對准中心（圖 6）。法蘭上所用的螺栓應當是與螺栓孔緊配合的，這是因為螺栓要承受剪力，通常採用的配合是 A/H 。

絕大多數法蘭都是與曲軸本身鍛成一個體的，因此這種結構就增加了鍛造工藝上的麻煩。按照最近蘇聯研究的結果，認為焊接法蘭可應用在曲軸上，就是將法蘭單獨鍛造然後用電焊的方法使與曲軸本身焊接起來。這種方法被推薦在修理曲軸時採用，焊接結構如圖 7 所示。

發動機常常利用曲軸端部來傳動附件。例如在船用發動機上，有時用曲軸前端帶動起錨機；又如內燃機有時利用曲軸前端傳動冷卻水泵；在汽車拖拉機發動機上，常常利用前端傳動凸輪軸和風扇等。

馬力不大的內燃機多用人力啓動，啓動爪也是裝在曲軸前端，圖 8 是三種不同形式的啓動爪。在某些特种發動機上，例如在航空、坦克及可卸式汽艇發動機上，功率是由前端輸出。

一般來說，用來傳動附件的機構是很少裝在曲軸後端的。為了防止潤滑油從軸承內漏出，曲軸兩端通常裝有擋油設備。在高速內燃機

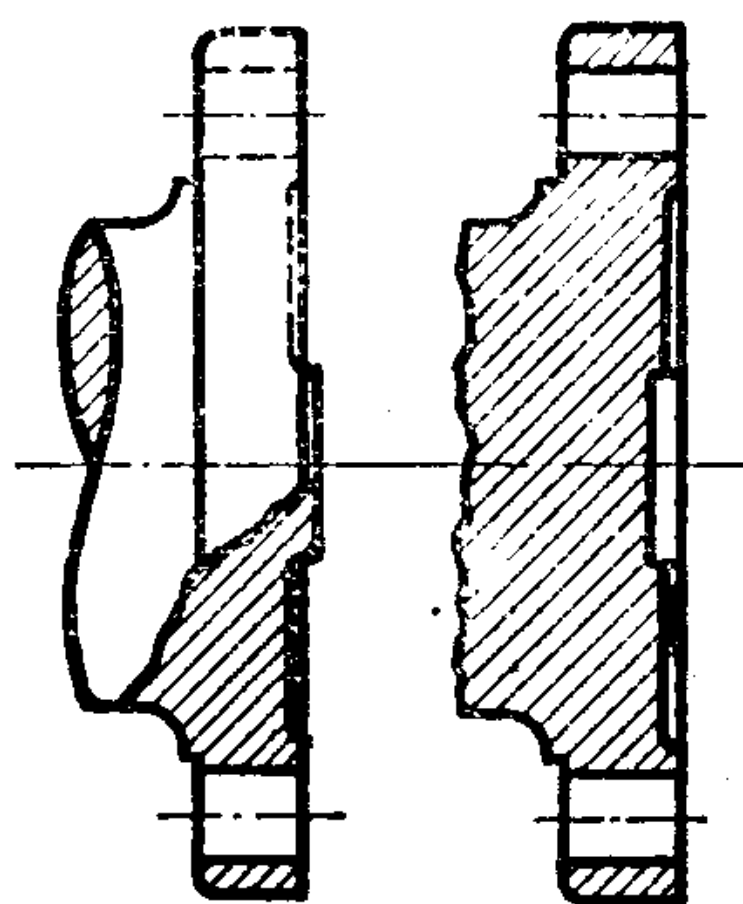


圖 6 曲軸的法蘭。

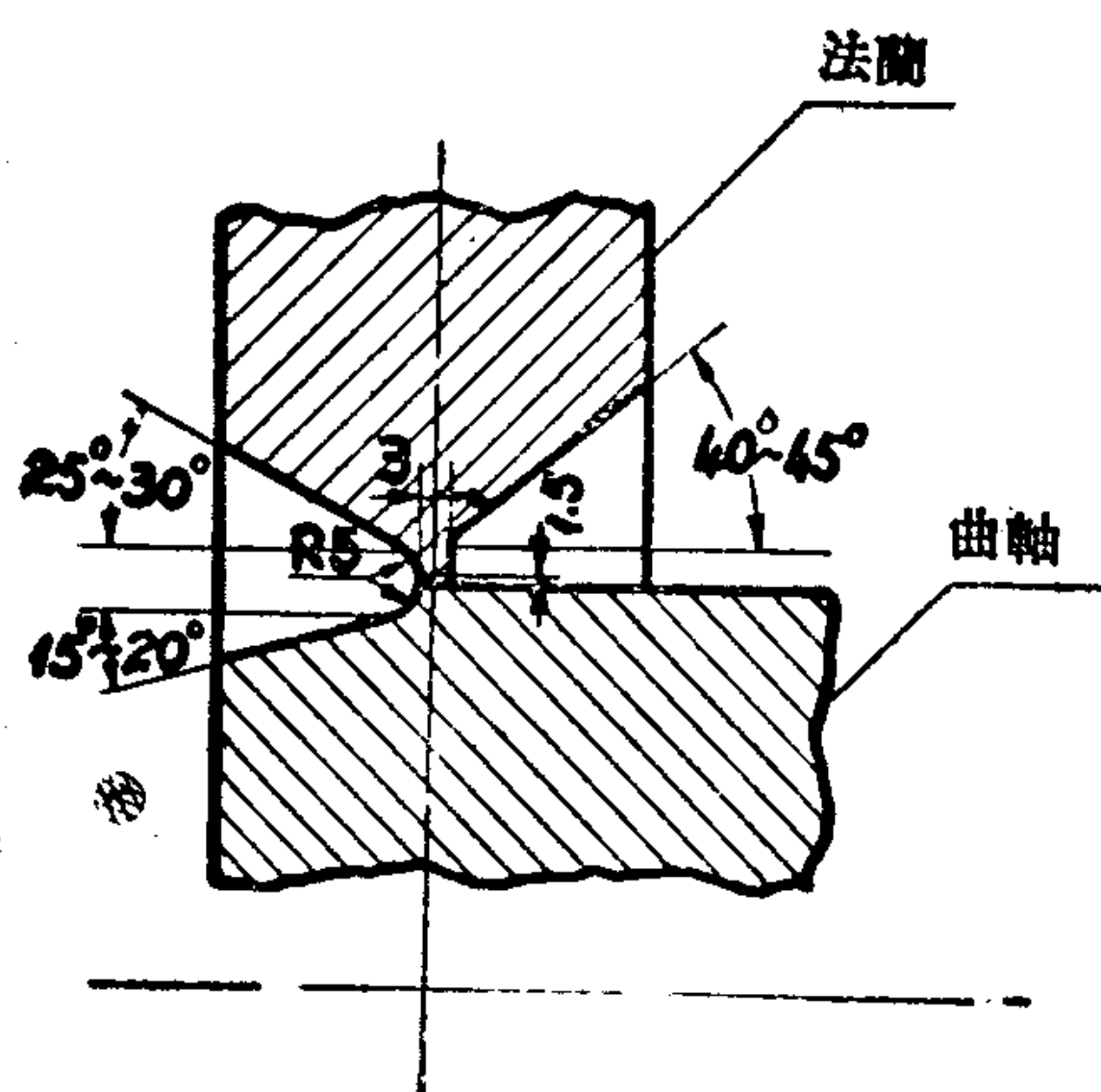


圖 7 曲軸的焊接法蘭。

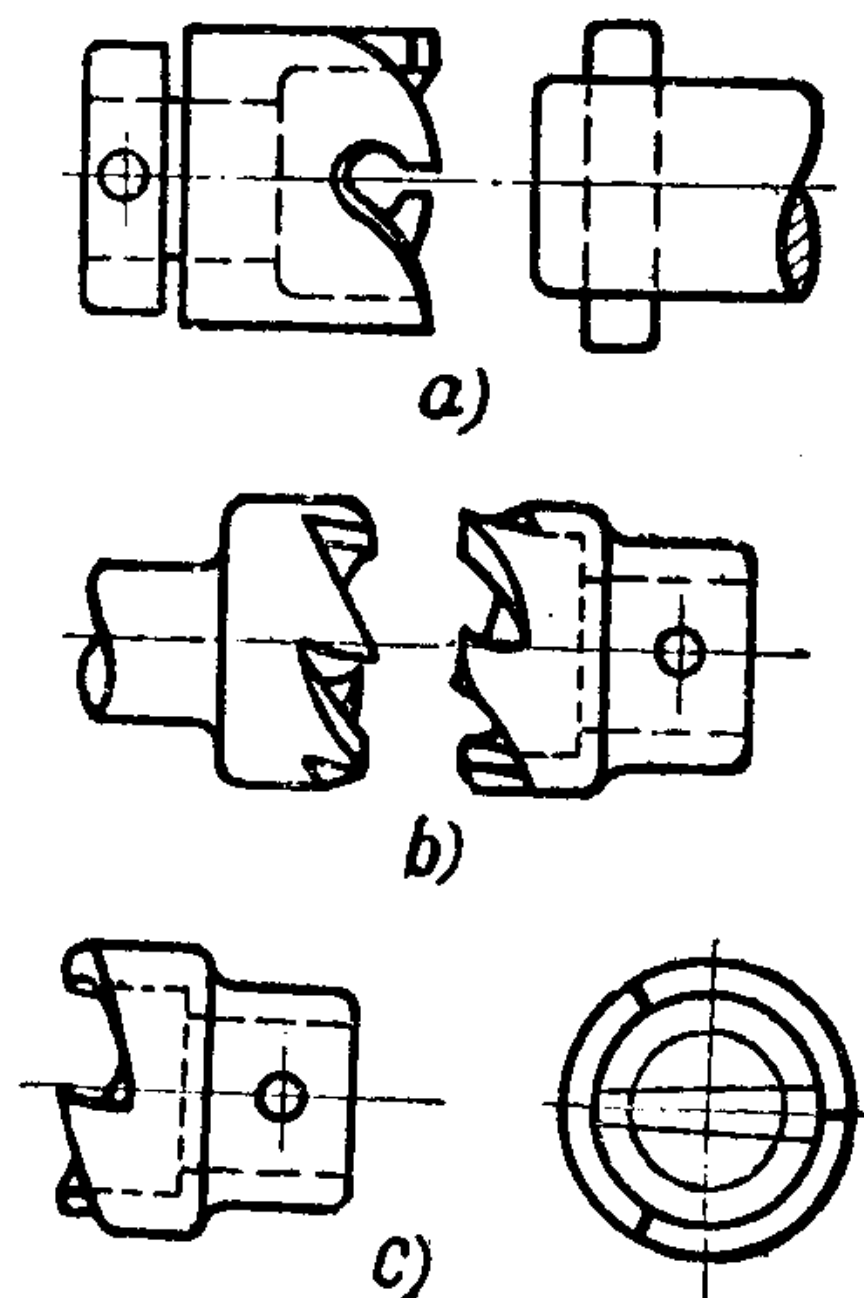


圖 8 啓動爪。

上,为了减小扭轉振动的振幅,避免危险的临界速度,常常在曲軸端部安裝減振設備。

5 軸身 軸身是除上述四部分以外的、与主軸頸同中心綫的圓柱形部分。它的直徑一般比主軸頸略小或者相等。軸身的作用是: 1) 保持曲柄銷之間有足够的距离使适应汽缸的中心距; 2) 安裝必要的傳动机件。例如在蒸汽机曲軸上,必須有足够的軸身以備安裝偏心輪(帶动汽閥用的); 又如在內燃机中,潤滑油泵的傳动齒輪一般是裝在軸身上。

除以上所述的五个主要部分以外,曲軸常常帶有平衡重量。曲軸的平衡重量的任务是平衡往复运动質量的惰性力、旋轉質量不平衡的离心力以及它們的力矩。按發動机的型式和結構,平衡重量是安裝在每一个曲臂上或者一部分的曲臂上。在平衡情况很好的場合中,往往不用平衡重量(參閱第六章)。

2 曲軸的分类

曲軸的分类方法并無統一的規定,按照不同的特征,可以得到各种不同的分类。

按照毛坯的制造方法,曲軸可分为:

1 鑄造曲軸 曲軸毛坯是澆鑄而成的。鑄造曲軸最大的优点就是成本低廉。很早以前,美国福特汽車就采用了合金鋼的澆鑄曲軸。自从密烘鑄鉄發明以后,由于成本較鑄鋼更低,有發展密烘鑄鉄曲軸的趨勢。最近苏联研究以球墨鑄鉄澆鑄曲軸,已獲得很大的成就。但是鑄造曲軸的質量,特別是大型曲軸,目前尙难控制,因此鑄造曲軸現仅应用在中小型發動机上。鑄造曲軸在將來肯定是要大大地推广的。

根据鑄造材料的不同,鑄造曲軸又可分鑄鉄和鑄鋼的兩種(詳見第三章)。

2 鍛造曲軸 曲軸毛坯是鍛造而成的。虽然鍛造曲軸的成本比較鑄造的要高得多,但是目前絕大多數曲軸都是鍛成的。根据制造工

艺的不同,又可分为自由鍛造和模型鍛造两种。自由鍛造适合于大型曲軸或者产量不大的中小型曲軸;模型鍛造需要制备鍛模,因此仅适用于大量生产的中型或小型曲軸,否則頗不經濟。

按材料的性質,曲軸可分为:

1 鑄鉄曲軸 用高强度鑄鉄(密烘鑄鉄或球墨鑄鉄)或合金鑄鉄澆鑄而成。目前使用鑄鉄曲軸的發動机日益增多,例如苏联 B-20 及 П-46 型二冲程双缸汽油發動机就是采用含鎢的合金鑄鉄曲軸(圖 9)。苏联 КД-35 型拖拉机的柴油發動机原用 45 号鋼鍛制,現在也趋向于以高强度鑄鉄来代替。苏联曾以球墨鑄鉄試鑄 6ДР30/50 型六汽缸柴油机的大型曲軸,不但証明球墨鑄鉄曲軸是完全合乎重型發動机的要求,且制造成本仅及鍛鋼的 1/3 (詳見第三章)。[●]

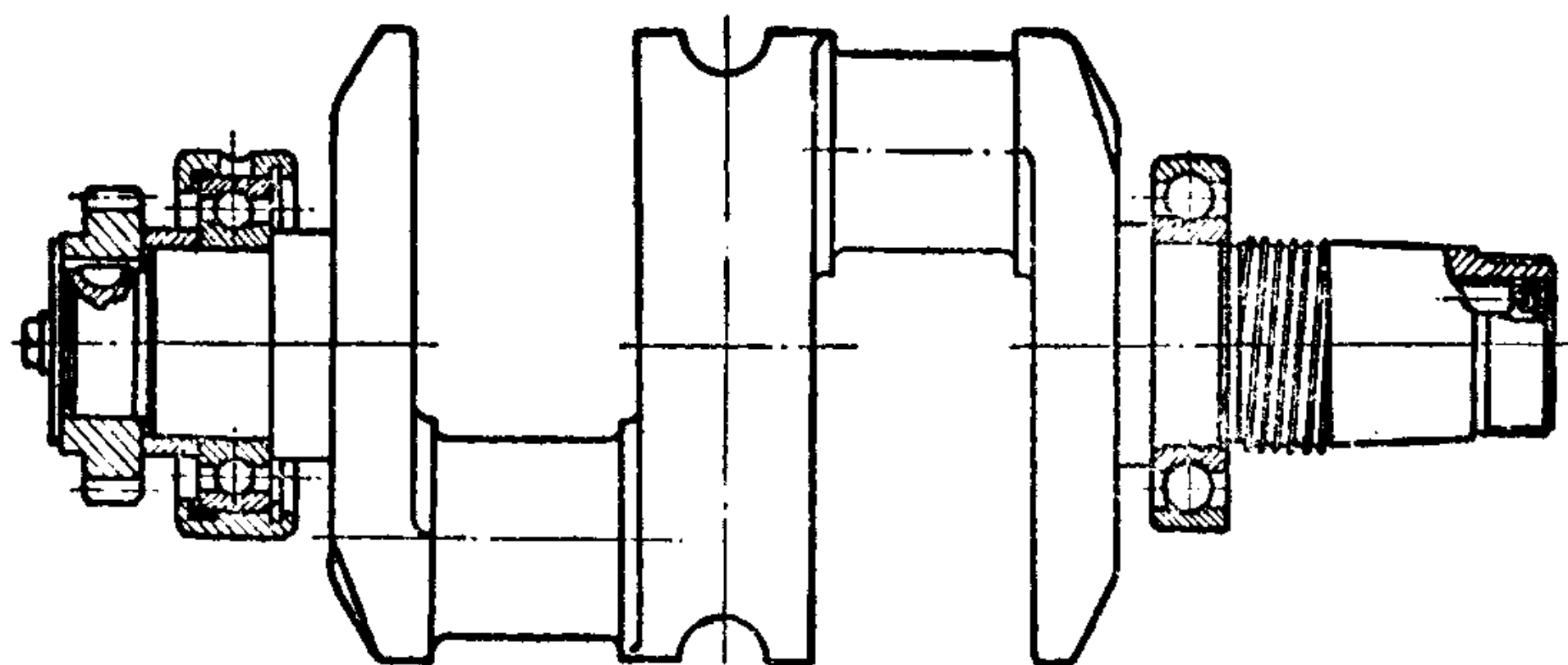


圖 9 双拐鑄造曲軸。

2 碳素鋼曲軸 材料为优質碳素鋼,含碳量自 0.25% 至 0.50%。低碳者仅用于低速輕型發動机或工作机,而一般均采用中碳鋼。目前絕大部分曲軸都是以碳素鋼为材料,有时在高速重型發動机上常常采用含錳略高的碳素鋼来制造曲軸。例如苏联 КДМ-46 型拖拉机柴油机的曲軸是用 45Г2 号鋼来鍛造的。

3 合金鋼曲軸 材料为合金結構鋼或者鑄造合金鋼。由于鑄鉄的技术飞躍进步,鑄造合金鋼的曲軸已日益减少。通常用来制造曲軸

● 我国也有个别工厂进行用球墨鑄鉄鑄造曲軸的試驗。——編者

的合金結構鋼有鉻鋼(40X)、鎳鉻鋼(40XH)、鎳鋼(40H)、及鎳鉻鎢鋼(18XHBA、25XHB)等。虽然合金鋼具有优越的机械性能,可以减小曲軸的尺寸以減輕發動机的重量,但是合金鋼的价格昂貴,所以在一般發動机上采用合金鋼来制造曲軸是减少了。只有在首先要求發動机的重量减至最輕,而对于成本降低是次要的情况下,才适用合金鋼曲軸,例如航空發動机和軍用船舶上的發動机等。

此外,在一根曲軸上有时采用两种材料,曲臂用鑄鉄或鑄鋼,而曲柄銷和主軸頸用鍛鋼。

按照曲拐的数量,曲軸可分为:

1 單拐曲軸 曲軸上只有一个曲拐,大多数用于單排星形發動机、双缸V形發動机、單缸發動机以及一部分工作机上。單拐曲軸的設計比較簡便,制造也較容易。对于扭轉振动來說,因为單拐曲軸的自由頻率一般較高,不易發生共振。

2 双拐曲軸 曲軸上有两个曲拐,适用于双排星形發動机、四缸V形發動机、双缸發動机和工作机等。双拐曲軸的两个曲拐通常成 90° 或 180° ,有时朝着同一方向或成其他角度。除星形發動机所用者外,絕大多數單拐和双拐曲軸是整体的。

3 多拐曲軸 曲軸上有三个或三个以上的曲拐。一般發動机和空气压缩机多采用之。虽然在結構上,多汽缸發動机要比單汽缸和双汽缸者复杂得多,但是大馬力只有靠增加汽缸才能得到,同时为了使發動机的工作达到平稳均匀,采用多汽缸也是必需的。不但如此,汽缸数的增多使發動机的大小和單位重量有可能减少。

按照尺寸和重量,曲軸可分成三类:

1. 大型的; 2. 中型的; 3. 小型的。

这三类曲軸的划分标准,并無統一的規定。一般來說,主軸頸直徑小于100公厘或重量小于100公斤者称为小型曲軸;主軸頸直徑大于250公厘或重量超过2000公斤者称为大型曲軸。

按照曲拐在曲軸上的地位,曲軸又可分为开式和閉式两种:

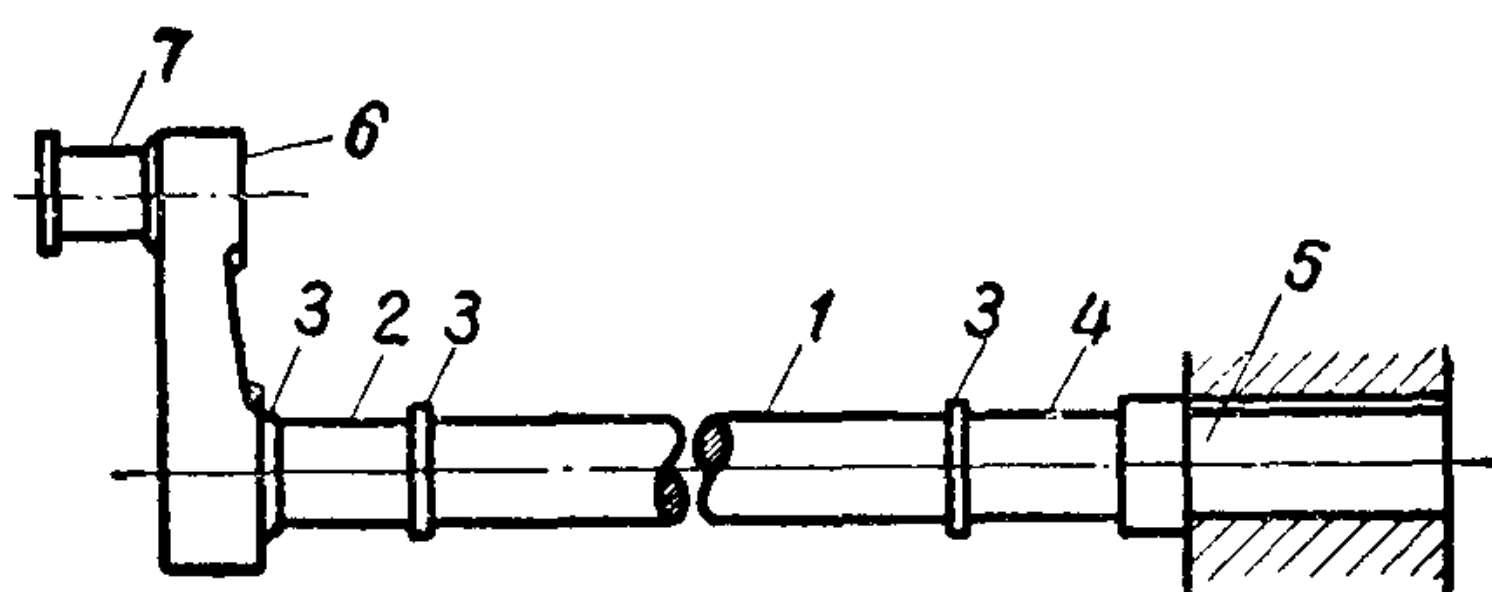


圖10 單拐開式曲軸。

1 開式曲軸 開式曲軸的曲拐在軸的端部，曲拐是由一個曲臂和一個曲柄銷組成。多數開式曲軸只有一個曲拐，但有時也可能有兩個。雙拐的開式曲軸的每端各有一個曲拐，兩曲拐的間隔角度應當是 0° 、 90° 或 180° 。開式曲軸是用在中小型蒸汽機上，但有時也用在工作機上。圖10是單拐開式曲軸的略圖。圖中1是軸身，2和4是主軸頸，3是凸肩，5是軸端，6是曲臂，7是曲柄銷。開式曲軸一般僅具有兩個主軸頸；曲柄銷是個別鍛出的，然後利用錐形梢端和銷釘（圖11b）或螺帽（圖11a）固接在曲臂上。這種方法使曲柄銷便于拆換。如果曲柄銷的磨損預期不大而不需要常常拆換者，也可以採用重壓或紅套的方法配接。曲臂與軸身一般是分別製造的，加工後再用重壓或紅套配合。

2 閉式曲軸 閉式曲軸的曲拐是在兩個主軸頸的中間，絕大多數的曲軸均屬於此類，如圖9和圖12所示。在輕型機器的曲軸上，兩

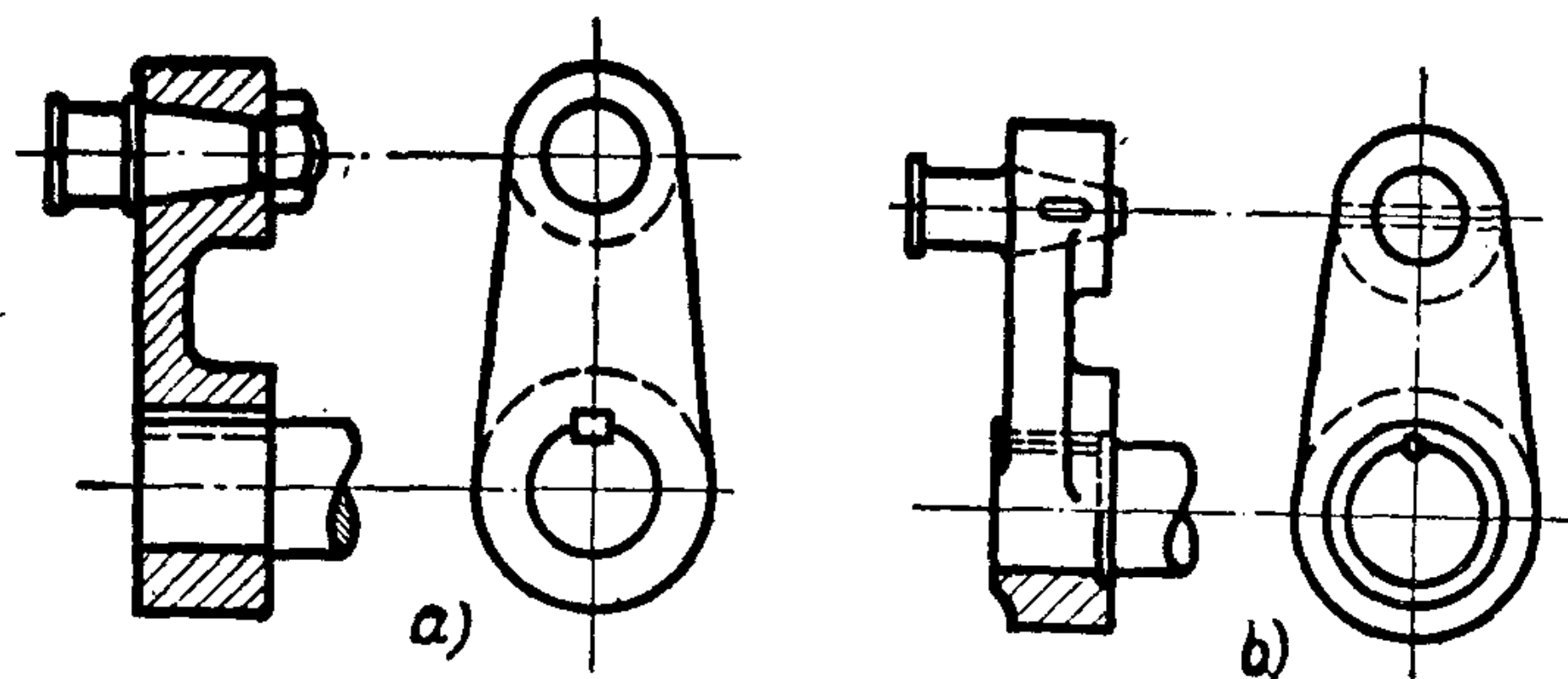


圖11 開式曲軸的曲柄銷。

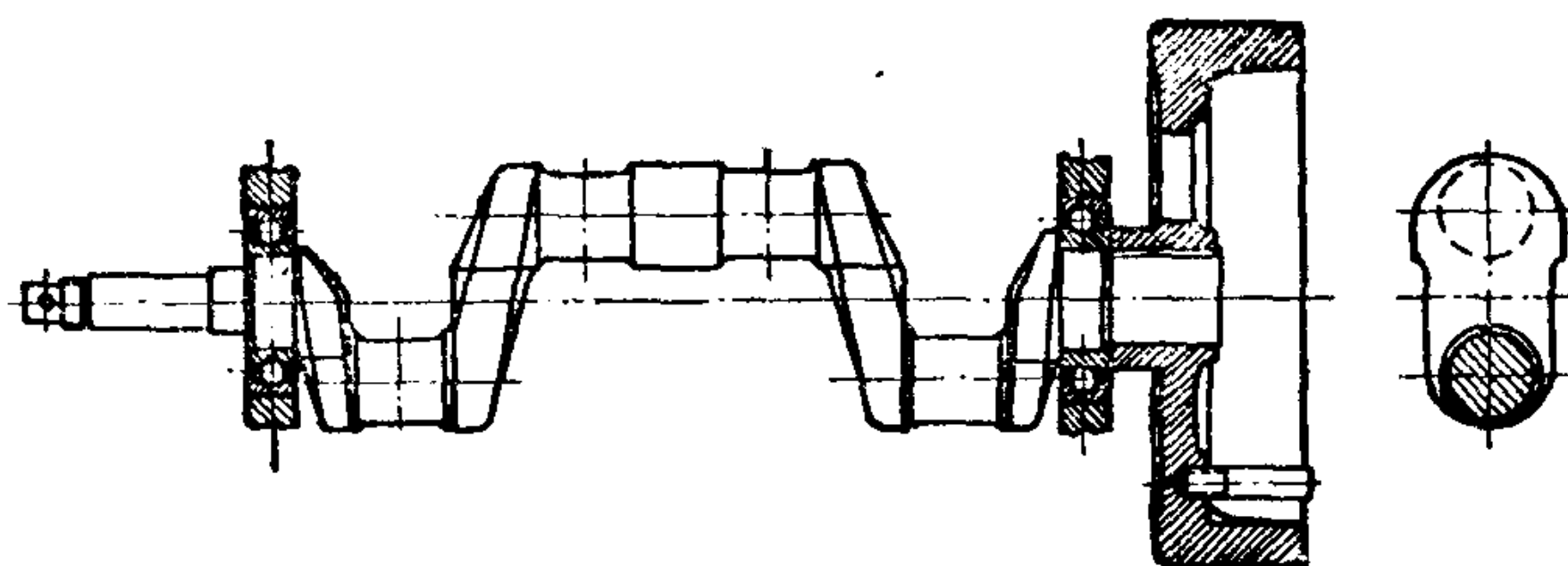


圖12 CT3-XT3型發動機的曲軸。

个主軸頸之間可能有二个或多个曲拐。圖 12 是苏联 CT3-XT3 型四冲程四缸汽油發動機的曲軸，它只有兩個主軸頸，由鋼料鍛制而成，軸承是采用滾珠軸承。这种四拐而仅有兩個主軸頸的曲軸只能用在爆發压力不超过 $30 \sim 40$ 公斤/公分² 的內燃机上。对于四缸柴油机不但宜采用兩個主軸頸的型式，而且也不能只用三个主軸頸。所以在二个主軸頸之間有多个或兩個曲拐的曲軸仅适宜于压缩比不大的汽油机、煤气机或空气压缩机。只有三个主軸頸的四拐曲軸的典型結構如圖 13 所示。圖 13 是汽車用的四冲程汽油發動機的曲軸，它应用在 ΓA3-M、ΓA3-MM 等型發動机上。

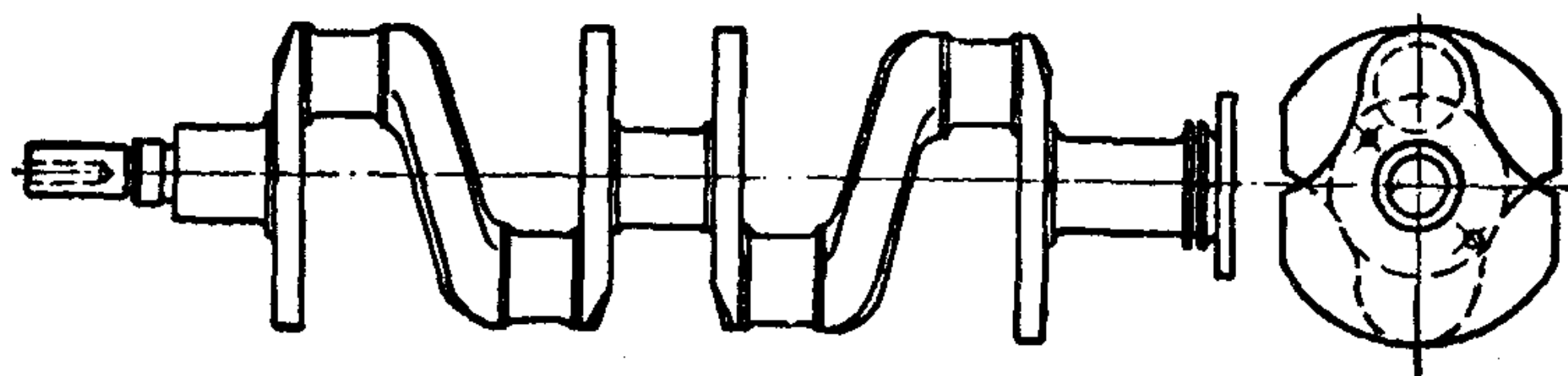


圖13 ΓA3-M型發動機的曲軸。

在重型發動机上，例如柴油机，每一个曲拐的兩旁各有一个主軸頸(圖14)，这样可以减少曲軸的弯曲变形。

閉式曲軸虽然在制造上較开式曲軸麻煩，但主軸頸受有較小的最大压力，且压力分布情况也較均匀，以致曲柄銷的磨損可以比开式曲軸小得多，因此閉式曲軸被广泛地采用。不但如此，开式曲軸不可